

# **Estudio y Evaluación de Esquemas de Control sobre Conversores Eléctricos de Potencia en el Ámbito de las Microrredes ac**

Manuela Alvarez Duque

Trabajo de grado presentado como requisito  
parcial para optar al título de  
Ingeniera Electricista

Director: Andrés Escobar Mejía, Ph.D  
Codirección: Eliana Y. Piedrahita Echavarría, Ing.

Pereira, Julio de 2021  
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
Programa de Ingeniería Eléctrica



## Tabla de Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	ESTADO DEL ARTE CONTROL DE MICRORREDES	4
3.	ESQUEMAS DE CONTROL EN MICRORREDES	6
3.1.	Generalidades del SST	6
3.2.	Estrategias de control	7
3.2.1.	Inversor <i>Grid Feeding</i> (GFD)	7
3.2.2.	Inversor <i>Grid Forming</i> (GFM)	10
3.2.3.	Inversor <i>Grid Supporting</i> (GS)	12
4.	CASO DE ESTUDIO Y RESULTADOS	15
5.	CONCLUSIONES	18
6.	REFERENCIAS	19

## 1. INTRODUCCIÓN

Las microrredes y los sistemas de generación distribuida adquieren mayor importancia a medida que se avanza a la red eléctrica del futuro, ya que son capaces de unificar la generación de pequeña y mediana escala con la energía limpia y los controles inteligentes. Su importancia también se debe a que, al integrar energías renovables, se reduce la dependencia energética de fuentes de energía que emplean combustibles fósiles, permitiendo que las redes de distribución sean modulares, bidireccionales y abiertas a cualquier forma de generación; el mayor inconveniente con su utilización es que la fuente primaria de las energías renovables (viento y radiación solar) es intermitente y variable en el tiempo. Para fortalecer su introducción a la red se hace necesario crear soluciones que permitan almacenar y asegurar su disponibilidad cuando es requerida o ejercer un control de la energía procedente de dichas fuentes y mantener los indicadores de calidad de energía [1]

Ante el panorama de las microrredes, es necesario la modernización de las redes eléctricas convencionales integrando componentes electrónicos más recientes que permitan mantener un flujo bidireccional de energía e integrar canales de comunicación y control para mejorar el transporte de electricidad, desde los puntos de generación limpia hasta el usuario final, permitiendo la operación eficiente, minimizando costos y aumentando la confiabilidad. La carencia de seguimiento y control en tiempo real en los sistemas convencionales (no inteligentes o no automatizados), crea una oportunidad de cambio para que las redes inteligentes o *Smart Grids* actúen como una solución en tiempo real. Estos beneficios no son solamente la introducción del concepto de red inteligente, sino también, aspectos ambientales, donde al realizar un uso eficiente de energía y aumentar el uso de fuentes renovables, se ayudará a reducir la huella de carbón del ser humano.

Tradicionalmente la electricidad siempre ha fluido de una central eléctrica a un cliente, con la implementación de fuentes adicionales procedentes de fuentes alternativas, la electricidad tiene que entrar en la red desde múltiples ubicaciones demandando una arquitectura tecnológica basada en optimización y un óptimo flujo de energía bidireccional. Es así como los controles modernos son necesarios para llevar energía solar y otras fuentes alternativas a la red de distribución y trasladarla a sus destinos. Por consiguiente, se necesitan

esfuerzos coordinados para adaptar la energía solar fotovoltaica y la energía eólica a los nuevos dispositivos en los sistemas de las redes inteligentes, por lo que estos últimos deben ser capaces de integrarse con los equipos existentes y disponer de herramientas informáticas para analizar la integración de las energías renovables en los sistemas energéticos.

La evolución de una red eléctrica convencional hacia una *Smart Grid*, requiere entonces que se integren funciones básicas como: Sensado y medición inteligente, comunicaciones digitales, control y protección automática, manejo y visualización de datos, monitoreo y prevención, predicción y diagnóstico, modelado en tiempo real, integración de recursos distribuidos de generación y almacenamiento para proporcionar continuidad del suministro [1], dispositivos como transformadores de estado sólido o *Solid State Transformers* (SST), pueden operar en conjunto con sistemas de generación distribuida y almacenadores de energía dado que permiten el flujo bidireccional de energía. Estos dispositivos presentan numerosas ventajas sobre los transformadores de distribución convencionales, permiten flujo bidireccional de energía, regulan la frecuencia, el voltaje y la corriente, mejoran los índices de calidad de energía [2] y debido a su menor tamaño se reduce considerablemente el peso y espacio ocupado. Ahora bien, también es requerido un sistema de control para garantizar un suministro constante de energía a los usuarios de una manera óptima y económica, tal control es realizado regulando flujos de potencia de fuentes energéticas a través de inversores que pueden reducir o incluso eliminar la necesidad de filtros activos u otros dispositivos para cumplir con requisitos de calidad de energía.

La introducción a gran escala de fuentes de energía basada en dichos convertidores continúa creciendo, trae además grandes desafíos en términos de reducir el índice de amortiguación del sistema de potencia debido a la reducción del número de generadores síncronos. Esto se manifiesta con una alta tasa de cambio de frecuencia y reducción de la estabilidad de la red. Para prevenir lo anterior es sugerido que el control *grid feeding* sea reestructurado a un control *grid forming*, es decir se adapte ciertas características de su topología y control, esto con el fin de habilitar al convertidor para que se comporte mas cercano a una máquina síncrona. El inversor *grid forming* (GFM), controla activamente su salida de frecuencia y salida de voltaje, siendo utilizado ampliamente en diferentes configuraciones de microrredes. Se estima que la demanda de inversores *grid forming* se

incrementará considerablemente en el futuro, por lo que es importante tener buenos conocimientos sobre el comportamiento de estos tipos de inversores, su estrategia de control y diferentes topologías y hardware con las cuales pueden ser implementadas en microrredes [2].

También es necesario para la implementación de una *Smart Grid*, tener una filosofía orientada a la confiabilidad del suministro, esto adaptando de los estándares internacionales la interoperabilidad de la red eléctrica y basando su implementación en un punto de vista normativo que permita proporcionar enfoques alternativos y mejores prácticas para lograr la interoperabilidad de la *Smart Grid*, el estándar IEEE STD 2030 ha definido las principales directrices y ha trazado la hoja de ruta dirigida a establecer el marco de desarrollo de un cuerpo de normas nacionales e internacionales, basado en técnicas transversales en aplicaciones de potencia, intercambio y control de la información mediante comunicaciones [3].

El presente trabajo de investigación pretende realizar un estudio y comparación de esquemas de control sobre convertidores eléctricos de potencia en el ámbito de las microrredes ac; esto partiendo de un análisis matemático en el dominio de la frecuencia y usando la transformada dq, para entender cómo trabajan estos tipos de controladores, que variables son controladas y obtener expresiones matemáticas suficientes para poder trabajar con estos controles, dichos esquemas son simulados en el software Matlab/Simulink. El documento está organizado de la siguiente forma: en la Sección II, se presenta un panorama mundial y nacional acerca de las microrredes y estrategias de control típicas, en la Sección III se introduce el concepto de *Smart Grid*, SST y las estructuras de control típicas generales, usadas en microrredes ac, en la Sección IV se presenta un sistema de prueba, el caso de estudio y una comparación entre el control *grid feeding* y el control *grid forming* junto los resultados obtenidos de la simulación en Matlab/Simulink. Finalmente se listan las conclusiones en la Sección V.

## 2. ESTADO DEL ARTE CONTROL DE MICRORREDES

Las microrredes en el panorama mundial son observadas como un primer paso de prueba de la integración de tecnologías en una Red Inteligente, esta tecnología se encuentra en una etapa de crecimiento y actualmente hay una oferta y soporte adecuado por parte de empresas del sector eléctrico e industrial que garantiza la implementación de microrredes.

En muchos países se están llevando a cabo microrredes inteligentes como proyectos piloto relacionados, investigaciones y ensayos con el fin de probar la viabilidad de este, antes de su ejecución a gran escala. Igualmente, el intercambio de conocimientos y experiencias ha allanado el camino para una mejor planificación y ejecución de los proyectos de las *Smart Grids*. Es así como países tales como: Australia, Canadá, Gran Bretaña, Estados Unidos, Corea del Sur, Irlanda, Colombia y Japón, están fomentando la estrategia gubernamental para lograr la seguridad energética y las bajas emisiones de carbono en el desarrollo de las fuentes no convencionales de suministro eléctrico [4].

La Unión Europea se ha planteado en cuanto a microrredes, una serie de objetivos como reducción del 20% de emisiones de CO<sub>2</sub>, cuota del 20% de generación renovable y mejora de la red eléctrica en un 20%. En el caso de Alemania se han fijado metas de reducción de gases de efecto invernadero del 80-95% para el 2050, 60% de participación de renovables en el sector eléctrico, y aumento de los niveles de eficiencia en el mismo sector al 50% [5].

Para el caso de Australia, con el proyecto comunidades de redes inteligentes, se está probando la detección de fallas en la red, el monitoreo de la calidad de la potencia eléctrica y la automatización de la distribución. Nueva Gales del Sur (Australia), fue seleccionada en 2010 para llevar a cabo el establecimiento de una red inteligente, donde la idea era construir un sistema WIMAX o *Worldwide Interoperability for Microwave Access*, con capacidad de subestación automática con capacidad de conexión de vehículos eléctricos y conexiones hasta de 50000 contadores inteligentes [2].

En esa misma línea el programa “Londres bajo en carbono” integró una serie de tecnologías de baja emisión en donde instalaciones fotovoltaicas, medidores inteligentes, vehículos eléctricos, estaciones de carga y bombas de calor en la red de distribución mejoran considerablemente la eficiencia energética y la respuesta a la demanda [6]. Norteamérica es

el mercado más grande para las microrredes debido al reciente deterioro en la confiabilidad de su red de distribución. En Estados Unidos el 40% del dióxido de carbono ha sido emitido por generación de electricidad a partir de fuentes dependientes de combustibles fósiles, esto debido al aumento en la demanda de electricidad [3].

Latinoamérica tiene el 8% de la capacidad total implementada en microrredes [2]. El costo de energía solar y eólica ha declinado hasta en un 90% y se ha presentado un 25% en crecimiento a nivel mundial anual de la capacidad instalada de energías renovables [3].

Las microrredes ac o híbridas son la arquitectura más utilizada en Colombia y la mayoría de las microrredes se encuentran y se constituyen en una alternativa de electrificación y desarrollo de zonas no interconectadas (ZNI) [7]. En Colombia la microrred inteligente de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín opera desde el 2012 de manera eficaz y eficiente, cuenta con la capacidad de gestionar la generación, los consumos, el almacenamiento y el transporte eléctrico; los diferentes subsistemas que integran la microrred son el centro de control, la casa inteligente hábitat, el sistema de tratamiento de residuos para producir energía con los biodigestores, los generadores solares, vehículos eléctricos y zonas de carga, entre otros, este programa busca proyectarse a la sociedad realizando recorridos a la población, para involucrar e ilustrar acerca de la importancia de estos sistemas de ahorro energético y motores de transformación que pueden ser desarrollables en la comunidad en general [8].

En países como Italia y Bélgica se han propuesto y aplicado técnicas de control de voltaje para un convertidor *grid forming* a una microrred ubicada en una zona industrial de la región de las marcas, realizando pruebas de rendimiento del sistema en diferentes escenarios y permitiendo una plataforma de simulación completa de la operación real en isla de la microrred [9].

En los últimos años se han llevado a cabo diferentes estudios y publicaciones en diferentes conferencias, acerca de técnicas de control *grid forming*, *grid supporting* y *grid feeding*. En el año 2018 se llevó a cabo en la isla de Jeju, Corea; estudios sobre la operación de una microrred ac autónoma a frecuencia constante y con generación de energía reactiva a partir de generadores *grid forming*, *grid supporting* y *grid feeding*, esto a partir de Matlab/Simulink [10].

En ese mismo año se llevaron a cabo evaluaciones de soporte de frecuencia de red en la isla de Oahu, basado en inversores utilizando inversores fotovoltaicos de vatios- frecuencia e inversores *grid forming*, los resultados de la simulación indican que la implementación de inversores fotovoltaicos y el control *grid forming* proporciona un control de frecuencia robusto en este sistema de energía en isla [11].

### 3. ESQUEMAS DE CONTROL EN MICRORREDES

#### 3.1. Generalidades del SST

Un SST es un tipo de convertidor de energía eléctrica que reemplaza un transformador convencional utilizado en ac en distribución de energía eléctrica; es más complejo, de menor tamaño y más eficiente que un transformador convencional, dado que funciona a alta frecuencia. Este transformador puede manejar tanto dc como ac y puede ser controlado electrónicamente para que responda casi instantáneamente a problemas de calidad de energía (*sags*, *swells*, armónicos, bajo factor de potencia, etc.)

Los SST poseen características como: proveer un aislamiento galvánico en la entrada y salida del convertidor, controlar el flujo de potencia en ambas direcciones, proveen compensaciones a las perturbaciones en la línea, y proveen interfaces para conectar generadores de potencia o sistemas de almacenamiento de energía. Gracias al flujo bidireccional de energía permiten la instalación de sistemas de generación distribuida y almacenadores de energía, alimentación de cargas en dc, mejora de la calidad de energía y la posibilidad de modificación en línea de características de magnitud de corriente, voltaje y frecuencia capaz de responder a fallas producidas en el lado de la red eléctrica o en las cargas.

La figura 1 muestra la estructura del SST, está conformado por un convertidor de energía eléctrica ac-dc, un convertidor dc-dc con enlace galvánico de alta frecuencia, un convertidor de dc-ac y un sistema de control *Power Point Control* (PPC) para lograr la interconexión con una red eléctrica como se aprecia en la figura 1 [12].



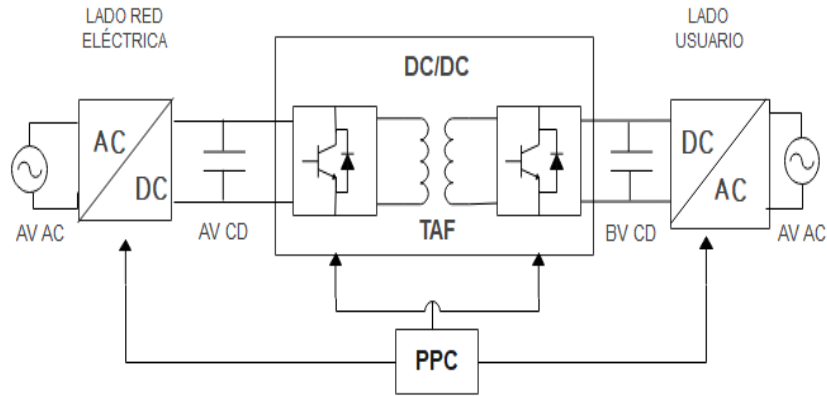


Figura 1. Estructura del transformador de estado sólido [12]

Existen diferentes tipos de configuración de circuitos para los transformadores de estado sólido en algunas de las configuraciones se hace uso de puentes activos duales o *Dual Active Bridge* (DAB).

Los convertidores DAB, son convertidores de alta frecuencia y alto flujo de potencia con un aislamiento galvánico, los convertidores DAB consisten en dos dispositivos conmutadores en puente completo, puente H o *Half Bridge* y un transformador de alta frecuencia, el transformador de alta frecuencia ofrece el aislamiento galvánico y ajusta los voltajes, los *Half Bridge* controlan la cantidad y la dirección del flujo de potencia [12].

### 3.2. Estrategias de control

Dependiendo de la operación y estrategias de control de los convertidores en una microrred ac, estos pueden clasificarse en *grid feeding* (también llamadas controladas por corriente o control PQ), *grid forming* (controladas por voltaje o VSI) y *grid supporting power converters*.

#### 3.2.1. Inversor *Grid Feeding* (GFD)

Estos inversores de potencia son diseñados principalmente para suministrar energía a una red existente, no pueden operar en modo isla si no hay convertidores *grid forming* o *grid supporting* o un generador local síncrono, configurando la amplitud de voltaje y frecuencia de la microrred de ac; su principal función es inyectar la potencia generada por la fuente dentro de la microrred con un factor de potencia unitario, es decir  $Q=0$ , su funcionamiento

suele estar regulado sea, por un controlador de alto nivel, como controlador de seguimiento del Punto de Máxima Potencia o *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) modificando el punto de operación de corriente o voltaje del micro generador o un controlador de planta de energía que establece valores para P y Q [12], [13]. Para micro fuentes no despachables tales como celdas fotovoltaicas, la potencia activa de referencia usualmente es establecida por el controlador de voltaje del bus dc del inversor, teniendo presente que el factor de potencia inyectado a la microrred es unitario y por ende la potencia reactiva de referencia es cero.

El objetivo principal del inversor GFD, es realizar seguimiento a las referencias de potencia especificadas, lo cual se realiza ajustando las corrientes de salida, en este caso de la microrred. El diagrama de bloques de control del inversor, controlado por corriente, se ilustra en la figura. 2, donde el sistema de potencia calcula las corrientes de referencia basado en la potencia, corriente y voltaje medidos en el punto de conexión (PC).

En la figura 2, PM hace referencia a la fuente de voltaje dc del inversor, kpwm es una ganancia que representa el inversor en el momento en que el voltaje en el punto medio del bus dc es cero [14], Tc(s) corresponde a la función de transferencia en lazo cerrado del controlador de corriente. El controlador de corriente o *inner loop* ayuda a rechazar todos los disturbios que ocurran en la red.

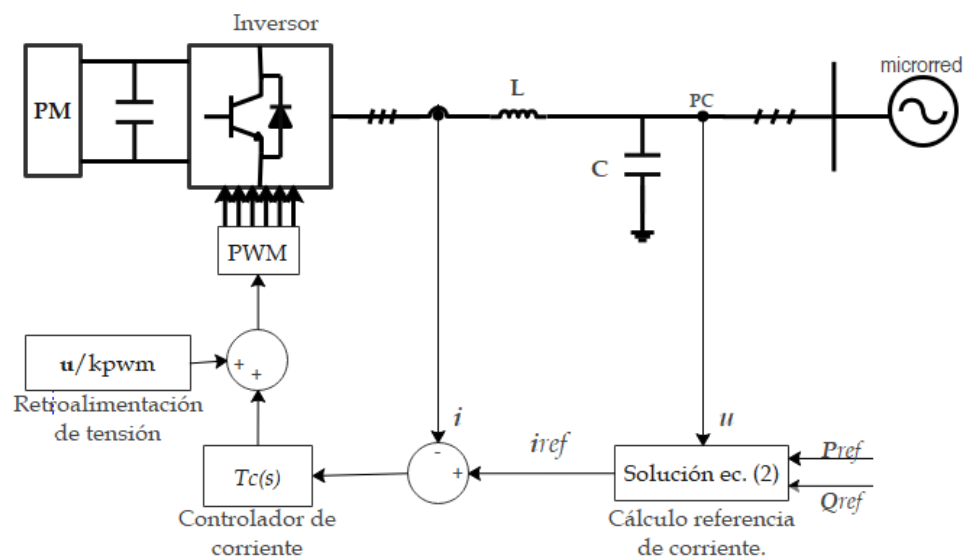


Figura 2. Diagrama de control del inversor *Grid Feeding* [14]

Los voltajes de fase en el punto de conexión están representados por el vector  $u$  y las corrientes de salida están representadas por el vector  $i$  así:

$$\begin{aligned} u &= [v_a \ v_b \ v_c]^T \\ i &= [i_a \ i_b \ i_c]^T \end{aligned} \quad (1)$$

El vector de corriente  $i_{ref}$ , puede ser obtenido resolviendo la siguiente ecuación de potencia instantánea:

$$P_{ref} = u \ i_{ref} \quad (2)$$

La corriente de salida del inversor es igual a la corriente que fluye por el inductor, trabajando en el dominio de la frecuencia, en el marco de referencia ABC, se tiene la siguiente relación:

$$sLi = u_{inv} - u \quad (3)$$

A través de una retroalimentación del voltaje  $u$ , el voltaje a la salida del inversor  $u_{inv}$ , pueden ser ajustado con el objetivo de sortear la caída de voltaje en el inductor causado por la corriente a través de el mismo [14].

Para el caso de operación trifásica balanceada, el sistema de control del inversor *grid feeding*, es diseñado en el marco de referencia  $dq$ , donde los voltajes y corrientes son señales dc. Aplicando la transformada de Park a (3), se obtiene un acople entre los ejes  $d$  y  $q$  de la corriente en el inductor de la siguiente forma:

$$sL \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{inv,d} \\ U_{inv,q} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega L \\ \omega L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

Esto es incluido en el controlador de corriente mostrado en la figura 3, en donde kpwm ha sido explicado previamente.

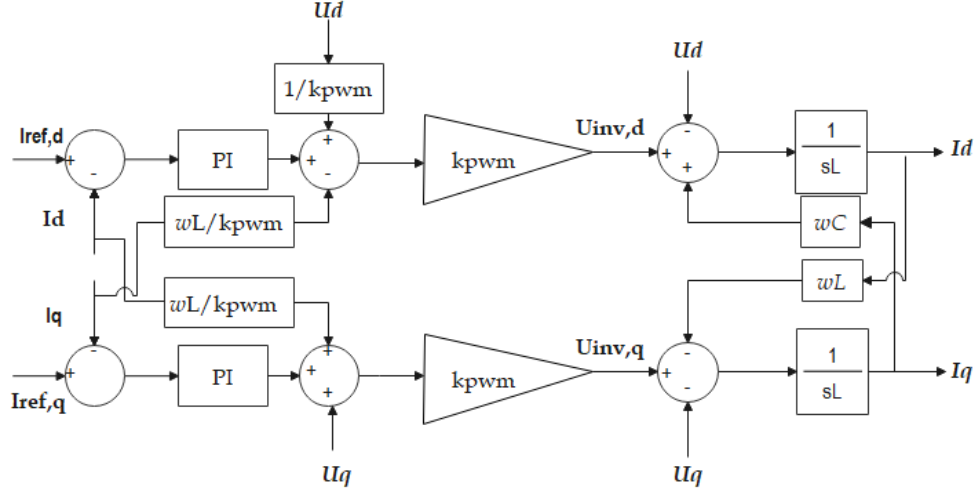


Figura. 3. Controlador de corriente en marco de referencia  $dq$  [14]

### 3.2.2. Inversor *Grid Forming* (GFM)

Los convertidores *grid forming* pueden ser representados como una fuente de voltaje ac ideal con una baja impedancia de salida, controlados en lazo cerrado para trabajar como dicha fuente ideal con una amplitud de voltaje controlado mediante controladores tipo *Droop* [15].

En una microrred, los inversores *grid forming* tienen dos objetivos principales, uno para la red conectada y otro para funcionamiento en isla [13]. Durante la operación conectado a la red, los inversores *grid forming* regulan potencias activas y reactivas inyectadas al bus ac para mantener el óptimo estado de carga de los dispositivos almacenadores de energía, así como para su descarga cuando esté siendo absorbida potencia desde el bus ac; por otro lado, durante operación en isla, es necesario para generar la onda sinusoidal de voltaje en el bus, donde la frecuencia y el voltaje se mantienen dentro de rangos requeridos en estándares de energía (ley 1715 de 2014, resolución CREG 030 de 2018) [15].

El voltaje ac generado por el inversor *grid forming* se utiliza como una referencia para el resto de los convertidores conectados a él, este tipo de inversores son alimentados con fuentes de voltaje dc estables, tales como baterías o celdas de combustibles [13].

Este tipo de control intenta emular el comportamiento de un generador síncrono siendo posible la operación en paralelo de *grid forming Voltage Source Converter* (VSC). Los VSC son convertidores auto conmutados que junto al control *grid forming*, buscan brindar

protección antes sobre corrientes que pudiesen destruir la electrónica de potencia, ayudan a compensar en milisegundos los cambios en el voltaje de la microrred, pero en contraste a esto, no contribuyen intrínsecamente en la inercia del sistema a diferencia de los generadores síncronos, debido a esto, se presentan tasas de cambio más altas en la frecuencia y otros efectos no deseados en el caso de altos porcentajes de generación basada en convertidores, donde la estabilidad del sistema eléctrico puede estar en riesgo al sobrepasar cierto número de estos conectados.

El control de un sistema de red balanceado mostrado en la figura 4, es realizado por dos controladores en cascada trabajando en el marco de referencia  $dq$ . El controlador de voltaje (*outer loop*) donde la variable controlada es el voltaje en el capacitor  $u$ , y el controlador de corriente (*inner loop*) donde la variable regulada es la corriente a la salida del inversor  $i$ , controlando entonces la corriente que fluye a través del inductor  $L$ .

El objetivo de control del inversor GFM es mantener el voltaje y la frecuencia en la microrred, éste es capaz de responder rápidamente a cambios en la carga. El controlador de voltaje mostrado en la figura 5. Regula el voltaje en el capacitor, donde, controlando esta variable los inversores *grid forming* alcanzan su objetivo de control. El controlador de corriente del inversor GFM es idéntico al mostrado en la figura 3 donde controlan la corriente a través del inductor.

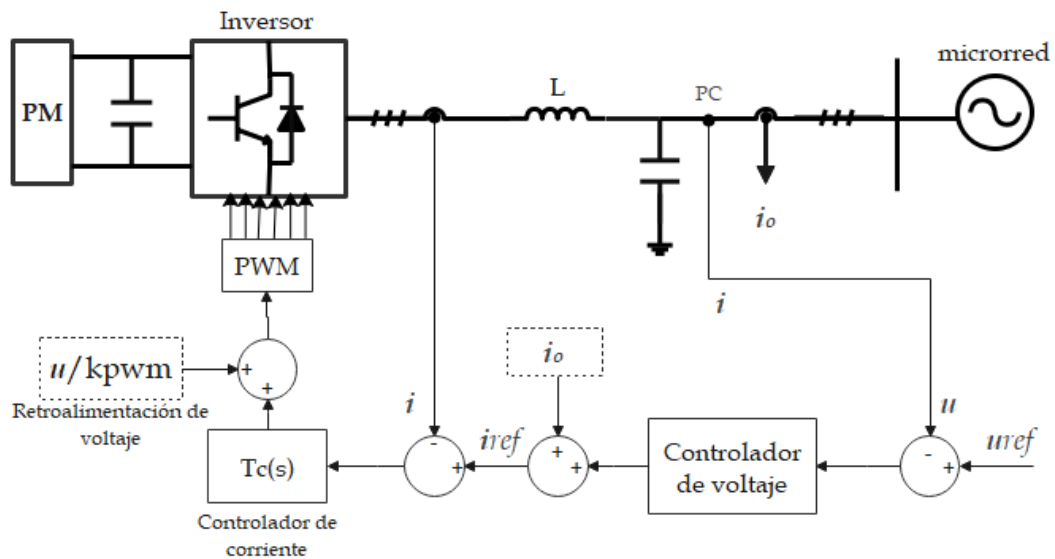


Figura. 4. Diagrama de control de inversor trifásico *grid forming* [14]

En marco de referencia natural, existe la siguiente relación de voltaje en el capacitor:

$$sCu = i - i_o \quad (5)$$

donde  $i$  e  $i_o$ , son las corrientes a través del inductor y la microrred respectivamente.

El voltaje  $u$ , es controlado finalmente ajustando  $i$  [14]. Aplicando la transformación de Park a (5), se obtiene un acople adicional entre los ejes  $d$  y  $q$  de voltaje en el capacitor, como muestra en (6), el diagrama de bloques que representa el controlador de voltaje se muestra en la figura 5.

$$s\mathbf{C} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{od} \\ I_{oq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega C \\ \omega C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 3.2.3. Inversor *Grid Supporting* (GS)

Estos convertidores durante operación en isla y dependiendo de las características de la microrred, pueden ser o no capaces de mantener la frecuencia y voltaje del bus dentro de los límites deseados, es decir estos están destinados a compartir carga proporcional a sus capacidades de potencia, al límite de energía que puede ser absorbida o suministrada por el sistema de almacenamiento, por lo tanto, se usan generadores o almacenadores adicionales, para ayudar a estos convertidores. La instalación de sistemas de energía mejora la estabilidad de la red, las tecnologías más usadas son las baterías y los supercondensadores.

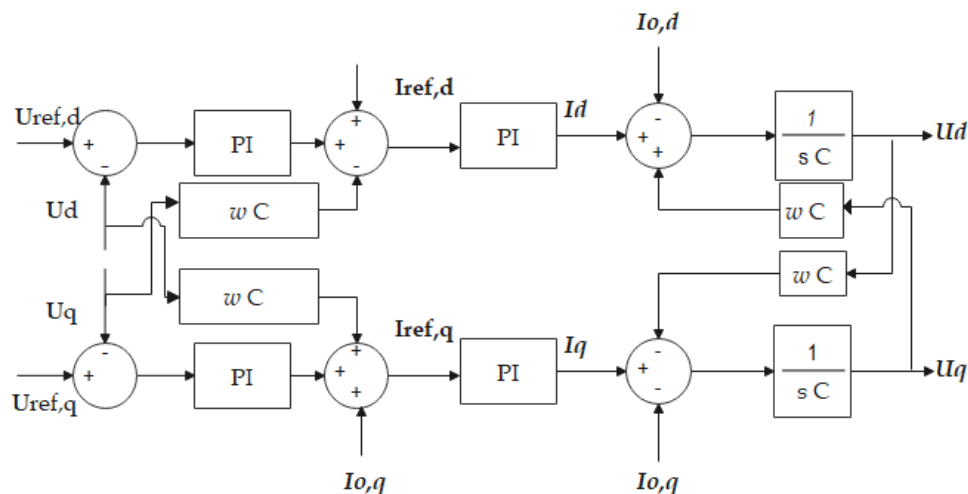


Figura 5. Controlador de voltaje en marco de referencia  $dq$  [14]

Estos inversores conectados a los generadores o almacenadores adicionales se conocen como inversores *grid supporting* los cuales están equipados con controladores tipo *droop* para proveer potencia activa y reactiva manteniendo una buena calidad de energía en el bus de ac.

Estos suelen tener un control tipo *droop* para regular tanto el voltaje de salida como la frecuencia modificando potencias activas y reactivas respectivamente. Este control es llamado también control  $P - f / Q - V$  y emula el control de los generadores tradicionales.

En modo isla, el control de estos inversores es ajustado para operar como una fuente de voltaje controlada, también pueden ser controlados para seguir la red e inyectar cierta cantidad de corriente como apoyo a los convertidores *grid forming* y *grid feeding*. Los inversores *grid supporting* pueden presentarse en dos estructuras de control diferentes, “*PQ-droop*” y “ $\omega U - droop$ ” [14].

El inversor *grid supporting PQ-droop* ajusta su potencia de salida como una función de la variación del voltaje y frecuencia en la microrred, comportándose en este caso, como una fuente de potencia. Su sistema de control es diseñado basado en el inversor *grid feeding* como ilustra la figura 6.

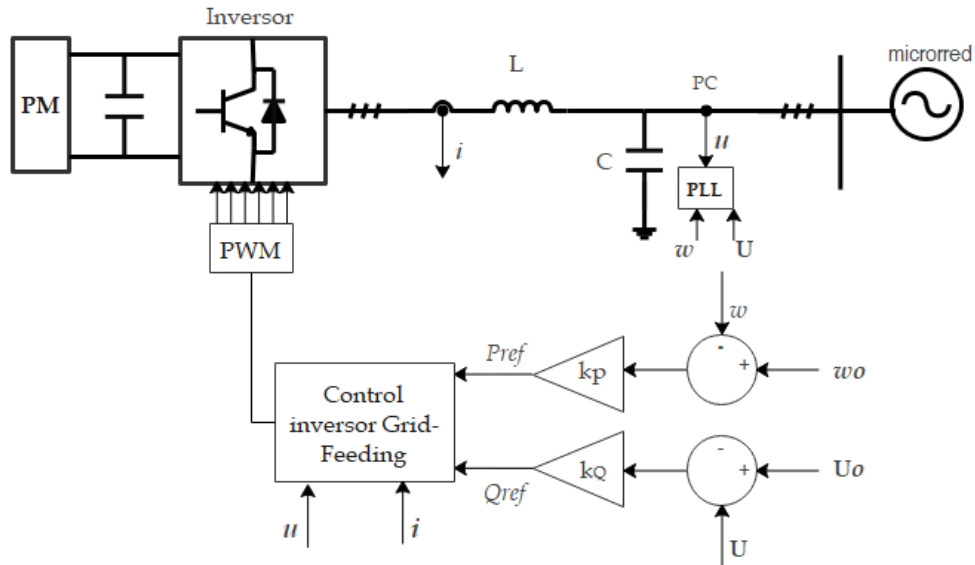
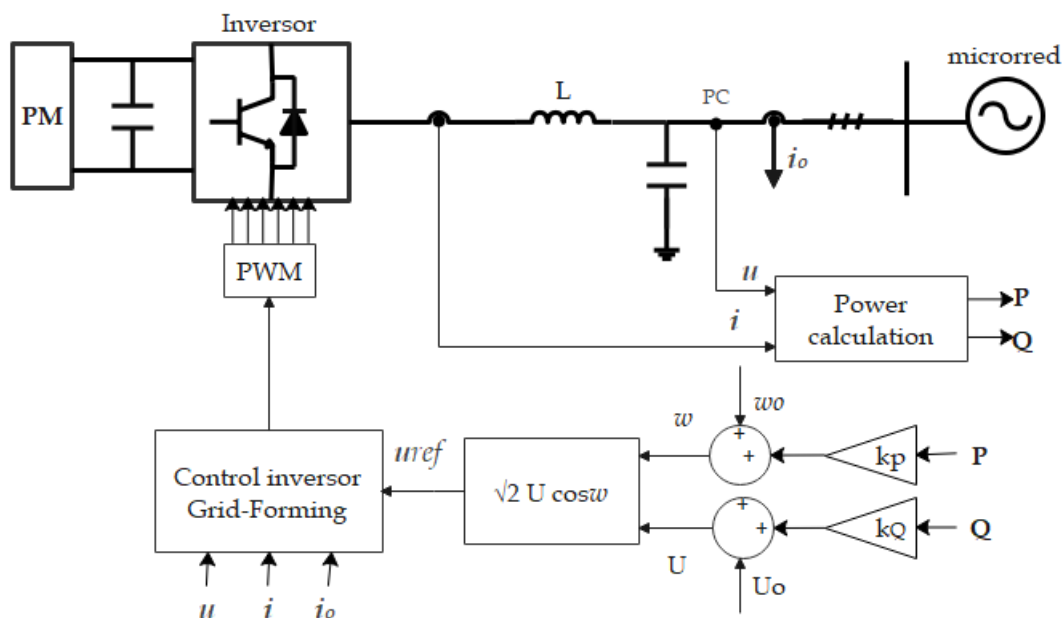


Figura 6. Inversor *Grid supporting PQ-droop* [14]

El inversor *grid supporting PQ-Droop* no puede operar por sí solo, a diferencia del inversor *grid supporting  $\omega U - droop$* , que puede trabajar de forma independiente en cualquiera de ambos modos de operación (conectado a la red o modo aislado).



14



#### 4. CASO DE ESTUDIO Y RESULTADOS

Con el fin de comprobar el funcionamiento de las estrategias de control *grid forming* y *grid feeding*, se implementa un sistema de prueba como el presentado en la figura 2, el cual consta de una fuente de voltaje dc en paralelo con un capacitor de entrada para formar el dc-link. Un inversor trifásico de conversión dc-ac modulado por PWM y un filtro LC de acople a la salida del inversor para eliminar y atenuar los armónicos de alta frecuencia [13]. El sistema es conectado a una fuente ac de frecuencia y voltaje constante que representa la microrred. La frecuencia de conmutación del PWM es de 3 kHz, la cual es mayor que la frecuencia natural del sistema de potencia (i.e. 60 Hz).

Para evaluar los esquemas de control presentados, se hacen variaciones de potencia entregada a la microrred en  $t=0.17$  s y  $t=0.333$  s. Para el análisis se conecta una carga con factor de potencia unitario representada en una resistencia de  $0.1 \Omega$  en el PC del convertidor dc-ac y la microrred, buscando comprobar cuánto tiempo tarda el sistema en estabilizarse y si efectivamente se mantiene constante el voltaje a la salida del filtro.

Para el diseño, se tiene en cuenta que el ancho de banda del controlador de voltaje es diez veces menor que el ancho de banda del controlador de corriente. Esto con el fin que el controlador de corriente o *inner loop* responda más rápido que el controlador de voltaje o *outer loop* [14].

Para el diseño del filtro pasa bajo se selecciona una frecuencia de corte de 750 Hz, un factor de calidad de 0.7071 y se establece un valor de resistencia interna del inductor de 15 m $\Omega$ . Para el cálculo del capacitor e inductor se tiene entonces que:

$$\begin{aligned} C &= \frac{1}{2 \pi f_c R Q} \\ L &= \frac{QR}{2 \pi f_c} \end{aligned} \tag{7}$$

Las características del sistema se listan en la Tabla I:

TABLA I. PARÁMETROS DEL SISTEMA

Parámetros de la red	
Vdc	450 V
Vinv	212 V
Parámetros filtro RLC	
R	15 mΩ
L	2.25 mH
C	20 uF

Donde, Vdc es el voltaje dc de entrada del inversor trifásico, Vinv es el voltaje *rms* a la salida del inversor.

Para comprobar la estrategia de control *grid feeding*, se realiza un cambio en la carga conectada en PC en un tiempo de 0.17 s. Luego de que entra la carga la potencia es de 3.2 kW. La figura 8 muestra voltaje trifásico, corriente medida en kA y potencia activa trifásica medida en kW, dichas mediciones son tomadas a la salida del filtro. Se observa que se llega a la referencia de potencia en un ciclo.

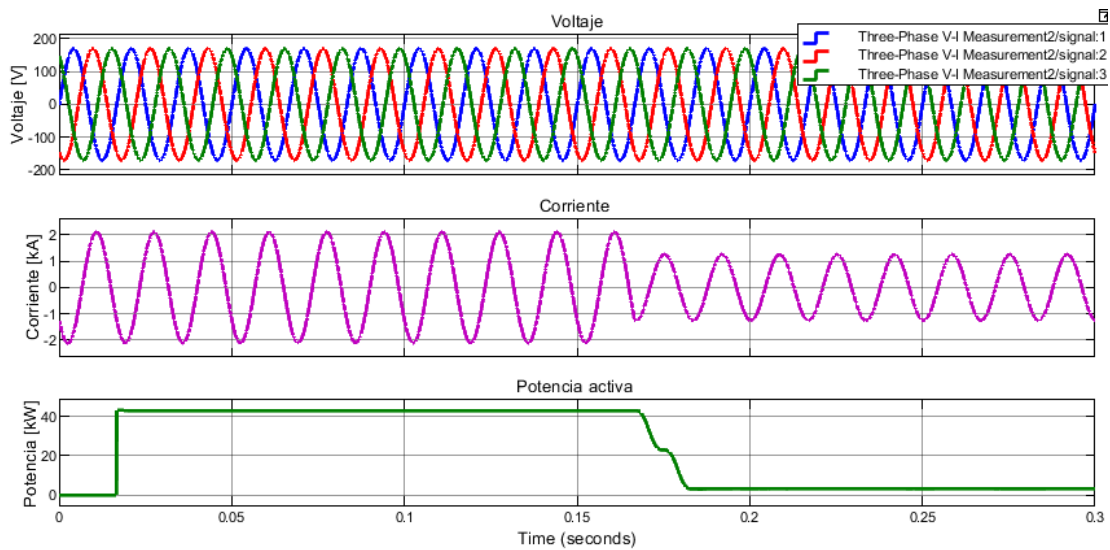


Figura 8. Potencia activa trifásica control *grid feeding*

El mismo procedimiento se realiza implementando la estrategia de control *grid forming*, realizando la misma variación de la carga en 0.17s. La figura 9, muestra los voltajes trifásicos, corriente y potencia activa trifásica medidas a la salida del filtro.

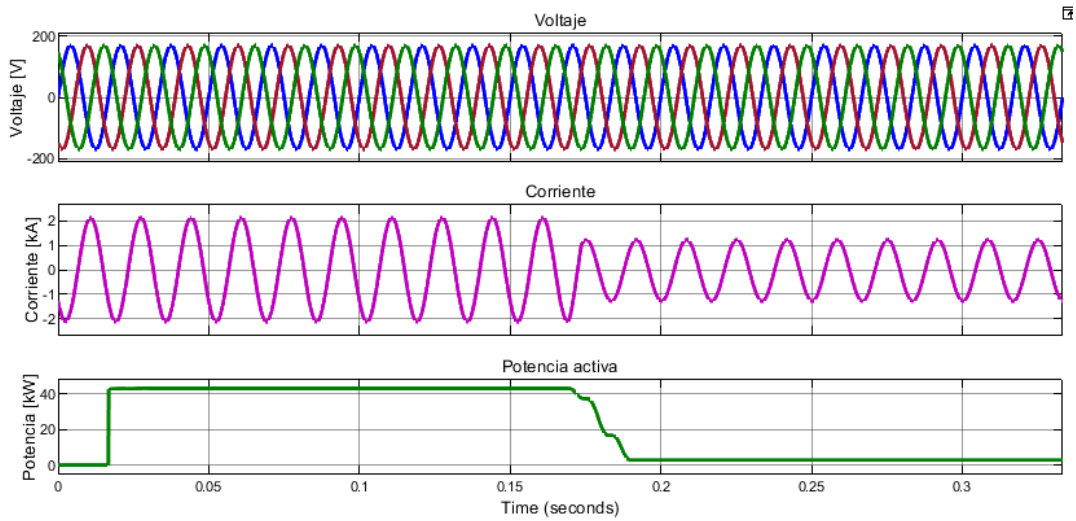


Fig. 9. Potencia activa trifásica control *grid forming*

## 5. CONCLUSIONES

El convertidor *grid forming* en su estructura de control es mucho más complejo que el convertidor *grid feeding*, esto debido al número de controladores PI que añaden tanto el controlador de corriente como el controlador de voltaje; el controlador de voltaje u *outer loop*, ayuda al sistema a alcanzar en menos tiempo el estado estacionario y ayuda a obtener el voltaje deseado a la salida.

En la figura 8 puede observarse que cuando cambia la referencia de potencia, se alcanza la nueva referencia en aproximadamente 16 ms, y se obtiene una potencia trifásica de 2.7 kW, el inversor *grid feeding* realiza una acción de control sobre las corrientes de salida (corriente a través del inductor), ajustando de forma adaptativa la potencia de salida del sistema y manteniendo el voltaje deseado en la microrred, a partir de la figura 9 mediante la estrategia de control *grid forming* y con la variación en la carga, el tiempo en el que es alcanzada la nueva referencia es de 20 ms y se obtiene una potencia trifásica de 2.7 kW, alcanzando en menor tiempo la referencia mediante el controlador *grid feeding*. Con esto se puede concluir que ambas estrategias de control realizan un control adecuado, manteniendo el voltaje constante en terminales del condensador y la estabilidad.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Sector electricidad. Transformadores inteligentes de estado sólido. [online]. Available: <http://www.sectorelectricidad.com/14124/transformadores-inteligentes-de-estado-solido/>.
- [2] O. Majeed Butt, M. Zulqarnain, Tallal Majeed Butt. "Recent advancement in *Smart Grid* technology: Future Prospects in the Electrical Power Network". *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 12, 1, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.004>.
- [3] J.D. Garzón-Hidalgo, A.J. Saavedra-Montes." Una metodología de diseño de microrredes para zonas no interconectadas de Colombia". *TecnoLógicas*, vol. 20, no 39, 2017.
- [4] V.A. Gómez, C. Hernández, E. Rivas. "Visión General, Características y Funcionalidades de la Red Eléctrica Inteligente (*Smart Grid*)" Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá-Colombia (2018). Vol-29 (2) [online]. Available: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v29n2/0718-0764-infotec-29-02-00089.pdf>.
- [5] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU). Energy Concept for an Environmentally Sound, Reliable and Affordable Energy Supply. 28. September, 2010.
- [6] Corporación Ruta N (2015). Observatorio CT+i: Informe No. 1 Área de oportunidad en microrredes Inteligentes. Disponible en: [www.brainbookn.com](http://www.brainbookn.com).
- [7] J.J. Díaz-González, Viabilidad regulatoria para implementar sistemas de micro redes con fuentes no convencionales de energía renovable – FNCER – Inter Colombia S.A. E.S.P., 2018, Retrieved from [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_electrica/182](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/182).
- [8] D.M. Torres. Agencia de noticias microrred inteligente UPB se proyecta a la sociedad. [Online]. Available: <https://www.upb.edu.co/es/noticias/micro-red-inteligente-proyecta>.
- [9] R.A. Mastromauro, "Voltage control of a *grid forming* converter for an AC microgrid: A real case study," 3<sup>rd</sup> Renewable Power Generation Conference (RPG 2014), Naples, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1049/cp.2014.0844.
- [10] D. Zhang, J. Fletcher, "Operation of Autonomous AC Microgrid at Constant Frequency and with Reactive Power Generation from Grid supporting and *Grid feeding* Generators," TENCON 2018-2018 IEEE Region 10 Conference, pp. 1560-1565, 2018.
- [11] M.E. Elkhatib, W. Du, R.H. Lasseter, "Evaluation of inverter-based Grid Frequency Support using Frequency-Watt and *Grid Forming* PV inverters," 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), pp. 1-5, 2018.
- [12] El transformador de estado sólido, capítulo 2. [Online]. Available. <http://repositorio.upsin.edu.mx/Fragmentos/Capitulo2capitulo1138.pdf>.
- [13] J.D. Bastidas, C. Ramos: "Types of inverters and topologies for microgrid applications". *UIS Ingenierías*. Vol. 16, no.1, (2017).
- [14] Guo, W, Mu, L. "Control principles of micro-source inverters used in microgrids" *Protection and Control of Modern Power Systems*. Vol.1, 5, 2016. <https://doi.org/10.1186/s41601-016-0019-8>.
- [15] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, P. Rodríguez. "Control of power converters in ac microgrids," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, no. 11, pp. 4734-4749, 2012, doi: 10.1109/TPEL.2012.2199334.
- [16] Ministerio de minas y energía. Comisión de regulación de energía y gas. Resolución no.30 de 2018 [Online]. Disponible en: <http://apolo.creg.gov.co>.